DOI: 10.22067/jfcei.2021.61615.0

پیش‌بینی نشست پی‌های سطحی برروی خاک‌های دانه‌ای بااستفاده از برنامه‌نویسی چندعبارتی (MEP)*

مقاله پژوهشی

بهاره فراهانی[۱] علی درخشانی[۲]

چکیده *به‌واسطه‌ی طبیعت ناهمگون خاک‌های غیرچسبنده و پیچیدگی پارامترهای مؤثر در نشست، پیش‌بینی دقیق نشست پی معمولا با دشواری‌های بسیاری همراه است. این موضوع از گذشته مدنظر پژوهشگران مختلفی بوده‌است و برخی محققان نیز معادلاتی برای پیش‌بینی نشست پی سطحی ارائه کرده‌اند. به‌دلیل عدم دقت کافی این روابط، پژوهشگران از روش‌های جدیدتری از جمله اجزای محدود، تفاضل محدود، محاسبات نرم و... برای پیش‌بینی نشست استفاده می‌کنند. در پژوهش حاضر مدل جدیدی بااستفاده از هوش مصنوعی برای پیش‌بینی نشست ارائه می‌گردد. هدف از توسعه‌ی این‌گونه مدل‌ها ایجاد فرمول‌هایی دقیق‌تر و درصورت امکان ساده‌تر می‌باشد. در این مقاله عملکرد الگوریتم برنامه‌نویسی چندعبارتی (Multi expression programming) برای پیش‌بینی نشست پی‌های سطحی واقع بر خاک دانه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد و مقادیر به‌دست‌آمده از مدل‌های جدید با دقیق‌ترین مدل‌های قبلی، مقایسه می‌شوند. سپس تحلیل عملکرد، مطالعه‌ی پارامتری، تحلیل حساسیت و ارزیابی ضریب اطمینان انجام می‌گردد. همان‌طور که از نتایج مشخص است، مقایسه بین مدل MEP و دقیق‌ترین مدل‌ها شامل ANN، GP، GEP و EPR در ادبیات فنی نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی در این مطالعه، با ضریب هم‌بستگی ۹۳/۴۵ در صد عملکرد بهتری نسبت‌به اکثر مدل‌های توسعه‌یافته قبلی دارد.*

واژه‌های کلیدی پیش‌بینی نشست، پی‌های سطحی، برنامه‌نویسی چندعبارتی، خاک دانه‌ای.

Settlement Prediction of Shallow Foundations on Granular Soils Using Multi Expression Programming (MEP)

A. Derakhshani B. Farahani

Abstract *Due to the non-homogeneous nature of cohesionless soils, and the complexity of the parameters related to settlement, generally the exact estimation of the foundation settlement involves many difficulties. This problem has been studied by many researchers and some equations have been proposed for estimating the settlement of shallow foundations. Because of the low accuracy of these equations, researchers are using more modern techniques like finite elements, finite difference, soft computing, and so on, for calculating the settlement. In the current study, a new model is proposed based on artificial intelligence to predict the settlement. The purpose of developing such models is to achieve more accurate and possibly simpler equations. In this paper, the performance of multi expression programming (MEP) method to predict the settlement of shallow foundations on granular soils is evaluated and the values obtained from the developed models are compared with those from the most accurate previous models. Then, the performance analysis, validation, parametric study and sensitivity analysis are performed. As can be seen from the results, the comparison between the MEP model and the most accurate models including ANN, GP, GEP and EPR in the technical literature showed that the model proposed in this study with correlation coefficient of 93.45 percent, performs better than most previously developed models.*

Key Word Prediction of Settlement, Shallow foundation, Multi Expression Programming, Granular soil.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۸/۱۱/۷ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۰/۲/۱۲می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده‌ی فنی، دانشگاه شاهد، تهران.
(۲) نویسندهٔ مسئول، استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی فنی، دانشگاه شاهد، تهران.
Email: adera@shahed.ac.ir

مقدمه

یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای انتقال بار سازه‌ها به زمین استفاده از پی‌های سطحی می‌باشد. به‌طورکلی، دو معیار اصلی برای طراحی پی سطحی وجود دارد که شامل ظرفیت باربری خاک و نشست پی می‌باشد. با این‌حال، در طراحی پی سطحی، به‌ویژه در پی با عرض بیش از یک متر، تأثیر نشست پی از ظرفیت باربری بیشتر است [1]. بنابراین پیش‌بینی دقیق نشست پی بسیار بااهمیت است. معمولا نشست پی‌های سطحی روی خاک‌های غیرچسبنده به‌دلیل فشردگی خاک، ناشی از تنش‌های اعمال‌شده و درنتیجه فرسایش خاک و هم‌چنین تغییر شکل جانبی خاک، به‌دلیل تمایل خاک برای فرار از زیر پی رخ می‌دهد. بارهای استاتیکی تحمیل‌شده توسط وزن سازه، بارهای دینامیکی وارده، تغییرات درصد رطوبت خاک ناشی از پدیده‌های مختلف طبیعی مانند نوسانات فصلی در سطح سفره‌ی آب زیرزمینی و اثرات پروژه‌های ساختمانی مجاور نیز از دلایل مهم نشست پی هستند [2].

به‌طورکلی شن و ماسه نسبت‌به خاک رس دارای طبیعت ناهمگون‌تری می‌باشند [3]. درنتیجه، احتمال نشست در شن و ماسه نسبت‌به پروفیل خاک رسی بیشتر است [4]. خاک‌های غیرچسبنده درجه‌ی نفوذپذیری بالاتری دارند، نشست در آنها به‌سرعت و بعد از اعمال بار در زمان کوتاهی رخ می‌دهد [5]. چنین نشست سریعی باعث تغییر شکل نسبتا سریع سازه‌ی فوقانی می‌شود که منجر به ناتوانی در جبران خسارت و جلوگیری از تغییر شکل بیشتر می‌شود. به‌علاوه نشست دائم و بیش‌از اندازه باعث تخریب سازه می‌شود [6]. محققان باتوجه به پیچیدگی‌های مختلفی که در تعیین نشست اثرگذار می‌باشد و هم‌چنین پایین بودن دقت فرمول‌های تجربی ارائه‌شده درگذشته، شروع به مدل‌سازی پدیده‌ی نشست کرده‌اند [6].

از روش‌های محاسبات نرم می‌توان برای پیش‌بینی نشست پی‌های سطحی واقع بر خاک دانه‌ای استفاده کرد. تعدادی از روش‌های عددی توسعه‌یافته شامل مطالعات شاهین و همکاران (۲۰۰۲) بااستفاده از شبکه‌ی عصبی مصنوعی (ANN-Artificial Neural Network) [3] ، استفاده از برنامه‌نویسی ژنتیک (GP-Genetic Programming) توسط رضانیا و جوادی (۲۰۰۷) [7] و استفاده از (GP)، (GEP-Genetic Expression Programming) و (EPR- Evolutionary Polynomial Regression) توسط شاه‌نظری و همکاران (۲۰۱٤) [8] می‌باشد. این روش‌ها می‌توانند با پیدا کردن روابط پیچیده بین پارامترهای ورودی، پارامتر خروجی را با دقت مناسب تخمین بزنند. در این مطالعه، بااستفاده از برنامه‌نویسی ژنتیک (GP) و براساس الگوریتم MEP، یک مدل برای تخمین نشست ارائه شده‌است. GP شاخه‌ای از الگوریتم‌های محاسباتی تکاملی است که از مفهوم تولید مثل بیولوژیکی گرفته شده‌است. برای مسائل مختلف مهندسی عمران از جمله مشکلات مهندسی ژئوتکنیک، GP در ارائه‌ی معادلات پیش‌بینی مناسب موفق بوده‌است (Khorrami 2019,Talebi 2018, Derakhshani 2017) [9,10,11].

هدف این مقاله پیش‌بینی دقیق نشست پی سطحی واقع بر خاک‌های غیرچسبنده بااستفاده از الگوریتم برنامه‌نویسی چندعبارتی (Multi Expression Programming (MEP)) می‌باشد. ابتدا مدل جدید برای تخمین نشست توسعه داده می‌شود و سپس فرمول پیشنهادی با روابطی که قبلا بااستفاده از تکنیک‌های محاسبات نرم ارائه شده، مقایسه می‌گردد. به‌علاوه، برای تحلیل عملکرد و اعتبارسنجی، مطالعه‌ی پارامتری و تحلیل حساسیت و هم‌چنین بررسی ضرایب اطمینان برروی مدل انجام می‌شود.

برنامه‌نویسی چندعبارتی

درحقیقت محاسبات نرم را می‌توان به‌عنوان مجموعه‌ای از تکنیک‌ها درنظر گرفت که رفتار ارگانیسم‌های زنده نظیر گیاهان، حیوانات و انسان‌ها یعنی رفتاری نرم، انعطاف‌پذیر، تطابق‌پذیر و هوشمند را شبیه‌سازی می‌کنند

[12].

MEP نوعی برنامه‌نویسی ژنتیک GP است که توسط اولتین (Oltean) و دامیترسکو (Dumitrescu) توسعه یافته‌است [13] و هم‌چنین تکنیکی برای تولید برنامه‌های رایانه‌ای بااستفاده از یک رویکرد تکاملی می‌باشد.

ایده‌ی اصلی در GP تولید برنامه، الگوریتم و ساختارهای مشابهی نظیر اینها در سطحی مرتبط با الگوریتم‌های تکاملی است. GP توسط کوزا (Koza) [12] درجهت گسترش الگوریتم‌های ژنتیک معرفی شد، که در آن برنامه‌ها با ساختار درختی و به زبان برنامه‌نویسی کاربردی LISP (Lost In Stupid Parenthese) بیان می‌شوند [12]. در این الگوریتم متغیرها به‌عنوان ساختار برنامه‌نویسی درنظر گرفته می‌شوند و مقدار خروجی نیز نشان‌دهنده‌ی این است که برنامه چه مقدار اهداف خود را تأمین نموده‌است. شرح جامع GP را می‌توان در [12,14] یافت. GP با موفقیت در بعضی از مسائل مهندسی عمران به‌کار رفته‌است [15-19]. MEP درمقایسه با سایر تکنیک‌های تکاملی مورد استفاده برای پیش‌بینی چندین مزیت مهم دارد:

۱. راه‌حل چندگانه را در یک کروموزوم کدگذاری می‌کند. این بدان معنی است که فضای جستجو بهتر مورد بررسی قرار می‌گیرد. ارزیابی چنین کروموزومی (در اکثر موارد) با همان پیچیدگی انجام می‌شود که در مورد یک راه‌حل واحد در هر کروموزوم انجام می‌شود.

۲. برنامه‌های رایانه‌ای را فرمان به فرمان ارزیابی می‌کند و نتایج جزئی را برای کلیه‌ی داده‌های آموزشی ذخیره می‌کند و هم‌چنین سرعت پردازش آن بسیار بالا می‌باشد.

الگوریتم MEP با ایجاد جمعیت تصادفی از افراد شروع می‌شود. مراحل زیر تا رسیدن به تعداد مشخصی از تولیدات تکرار می‌شود[13]:

۱. دو پدر و مادر بااستفاده از روش استاندارد انتخاب می‌شوند.

۲. والدین برای به‌دست آوردن دو فرزند جدید ترکیب می‌شوند.

۳. جهش فرزندان و جایگزین کردن بدترین و بهترین فرد در جمعیت فعلی انجام می‌شود.

هر کروموزوم MEP تعداد ثابتی ژن دارد. این عدد طول کروموزوم را مشخص می‌کند. هر ژن شامل یک فرمان و یک یا چند متغیر است. ژنی که یک تابع را کدگذاری می‌کند، شامل نقاطی برای اثبات تابع می‌باشد. در اینجا یک مثال از مدل خطی برای فهم بهتر آورده شده‌است. مدلی را در نظر بگیرید که اعداد در سمت چپ برای برچسب ژن خود قرارگرفته‌اند. این برچسب‌ها به کروموزوم تعلق ندارند زیرا هدف آن شرح و توضیح مدل است. در این مثال تعدادی عملگر F={+,×} و تعدادی متغیر T={a,b,c,d} آورده شده‌است.

1. a
2. b
3. +1,2
4. c
5. d
6. +4,5
7. × 3,5

حداکثر تعداد نمادها در کروموزوم MEP توسط فرمول (۱) آورده شده‌است:

$$\text{Number of symbols} = (n+1) \times (\text{Number of genes} - 1) + 1 \quad (۱)$$

که در آن n بیشترین تعداد عملگرها (در اینجا عدد ۲) و تعداد ژن‌ها برابر تعداد متغیرها (در اینجا عدد ٤) است.

«ترجمه» نشان‌دهنده رونویسی از کروموزوم‌های MEP است. ترجمه با تجزیه‌ی کروموزوم از بالا به پایین به‌دست می‌آید. یک نماد متغیر، یک عبارت ساده را مشخص می‌کند مانند: E_1, E_2, E_4, E_5 . نماد تابع، عبارت

پیچیده‌ای شامل متغیر و عملگر است، مانند: E_3, E_6, E_7.
به‌عنوان مثال، ژن‌های ۱، ۲، ٤ و ۵ در مثال قبلی عبارات ساده‌ای را تشکیل می‌دهند که توسط یک نماد متغیر واحد ایجاد شده‌اند که عبارتند از [20]:

$E_1 = a,$

$E_2 = b,$

$E_4 = c,$

$E_5 = d,$

ژن ۳ عملگر + را برروی متغیرهای کروموزوم ۱ و ۲ قرار می‌دهد؛ بنابراین عبارت کدگذاری شده‌ی ژن ۳ به‌این‌ترتیب است:

$E_3 = a + b.$

ژن ٦ عملگر + را برروی متغیرهای موجود در موقعیت کروموزومی ٤ و ۵ قرار می‌دهد و عبارت حاصله به‌این‌ترتیب کدگذاری می‌شود:

$E_6 = c + d.$

و ژن ۷ عملگر × را در موقعیت کروموزومی ۳ و ۵ قرار می‌دهد، درنتیجه ژن ۷ مانند عبارت پایین کدگذاری می‌شود:

$E_7 = (a + b) \times d.$

E_7 آخرین عبارتی است که توسط کروموزوم رمزگذاری شده‌است.

شواهد عملی و نظری برای برتری یکی از این عبارات نسبت‌به سایرین وجود ندارد. به‌همین دلیل است که به هر کروموزوم MEP اجازه داده می‌شود تعدادی عبارات برابر با طول کروموزوم (تعداد ژن‌ها) کدگذاری کند. کروموزوم شرح داده‌شده در بالا عبارات زیر را کدگذاری می‌کند:

$E_1 = a,$

$E_2 = b,$

$E_3 = a + b.$

$E_4 = c,$

$E_5 = d,$

$E_6 = c + d.$

$E_7 = (a + b) \times d.$

مقدار این عبارات با خواندن کروموزوم از بالا به پایین محاسبه می‌شود. بخشی از نتایج توسط برنامه‌نویسی دینامیکی محاسبه می‌شود و طبق قرارداد ذخیره می‌شود. باتوجه به مدل چندعبارته، هر کروموزوم MEP ممکن است به‌عنوان یک جنگل از درختان و نه به‌عنوان یک درخت واحد (که این یک برنامه‌نویسی ژنتیک) مشاهده شود. بااینکه کروموزوم MEP بیش از یک راه‌حل را کدگذاری می‌کند، اما دارای تناسب (Fitness) است. تناسب کروموزوم معمولا به‌عنوان تطابق بهترین عبارت کدگذاری‌شده توسط آن کروموزوم تعریف می‌شود. هر یک از این عبارات را می‌توان به‌عنوان یک راه‌حل ممکن برای یک مسئله در نظر گرفت. تطابق هر عبارت کدگذاری‌شده در یک کروموزوم MEP به‌عنوان بهترین تناسب بیان‌شده توسط آن کروموزوم تعریف شده‌است. برای حل مشکلات رگرسیون، تناسب یک کروموزوم MEP بااستفاده از معادله‌ی (۲) محاسبه شود [21]:

$$f = \min_{i=1,m} \left\{ \sum_{j=1}^{n} \left| E_j - O_j^i \right| \right\} \qquad (۲)$$

درجایی که n تعداد حالت‌های تطابق است، Ej مقدار مورد انتظار برای تطابق حالت j است، Oj مقدار برگشتی برای تطابق حالت j ام که توسط عبارت i ام در کروموزوم فعلی رمزگذاری شده و m تعداد ژن‌های کروموزومی است.

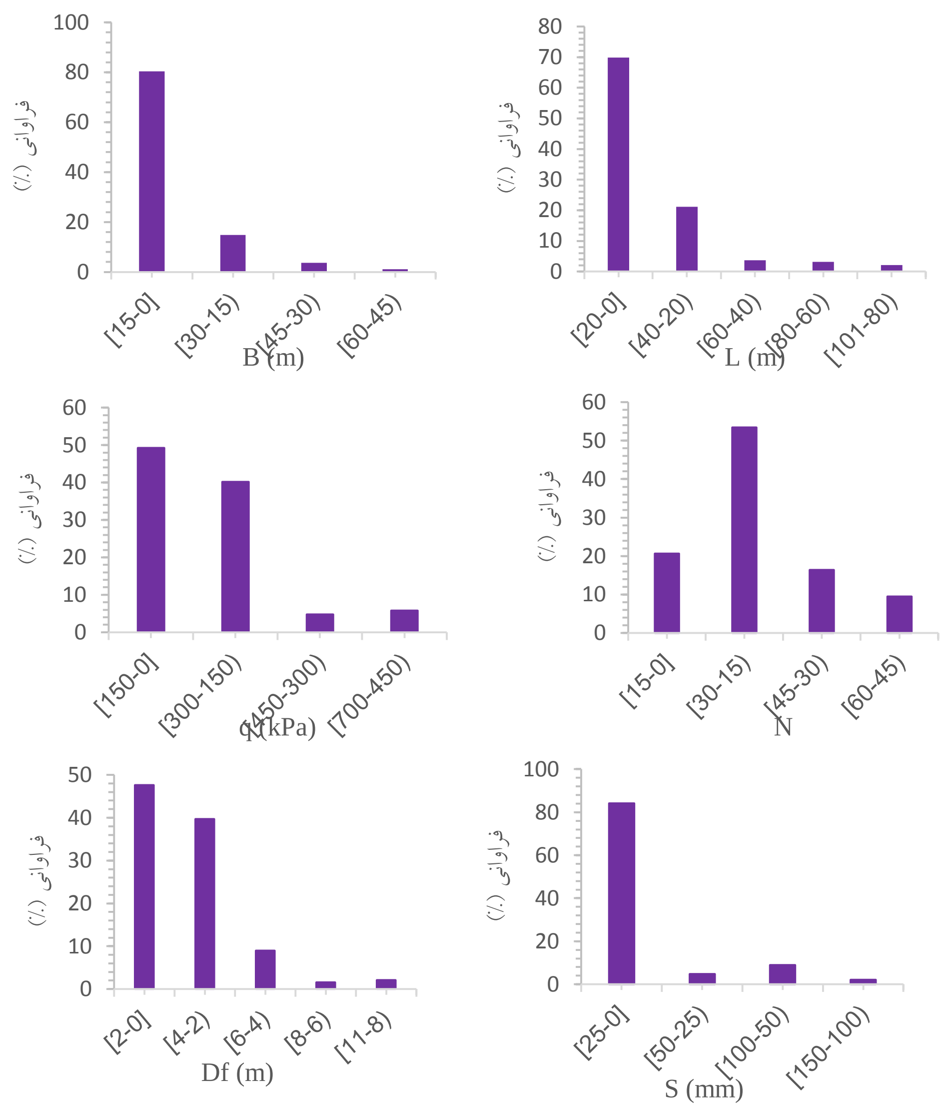
پایگاه داده‌ها

پیش‌بینی دقیق نشست نیازمند درک درستی از عوامل مؤثر بر نشست است. در بیشتر روش‌های سنتی عوامل اصلی تأثیرگذار بر نشست شامل تعداد (N) ضربات آزمایش SPT، عرض پی‌ها (B)، ظرفیت باربری پی‌ها (q)، طول پی (L) و عمق مدفون پی (Df) می‌باشند [22]. از عمق سطح آب زیرزمینی در این مقاله صرف‌نظر شده‌است زیرا فرض بر این است که اثر آن در تعداد (N)

ضربات آزمایش SPT لحاظ شده‌است [23]. جدول (۱) لیستی از مراجع داده‌های موجود در پایگاه داده‌ی مورد استفاده در این مطالعه را نمایش می‌دهد. ۳۸ داده مربوط به آزمایش‌ها در مقیاس کوچک است و ۱۵۱ داده از آزمایش‌های بزرگ‌مقیاس به‌دست آمده‌اند. شکل (۱) هیستوگرام داده‌های مورداستفاده در مدل‌سازی را نشان می‌دهد.

جدول ۱ تحقیقات قبلی دربردارنده داده‌های تجربی مورد استفاده در این مطالعه

مراجع	تعداد
Bazaraa 1967 [24]	۵
Briaud and Gibbens 1999 [25]	٤
Burbidge 1982 [26]	۲۲
Burland and Burbidge 1985 [22]	۱۲٥
Maugeri et al. 1998 [4]	۲
Picornell and Monte 1988 [27]	۱
Wahls 1997 [28]	۳۰
کل	۱۸۹



شکل ۱ هیستوگرام داده‌های مورداستفاده در مدل‌سازی

جدول ۲ آمار توصیفی از متغیرهای مورداستفاده برای ساخت مدل

پارامتر	مجموعه داده	B (m)	L (m)	q (kPa)	N	Df (m)	S (mm)
بیشینه	آموزشی	٦۰	٦۰	٦٦٦	٦۰	۱۰	۱۲۱
	ارزیابی	٥٥	۱۰۱	٦۹۷	٦۰	۱۰/۷	۱۲۰
کمینه	آموزشی	۰/۹	۰/۹	٦۳	٤	۰	۱/۳
	ارزیابی	۰/۸	۰/۸	۱۸/۳۲	٤	۰	۰/٦
میانگین	آموزشی	۱۲/۲٥	۱٥/۷۳	۲۰۷/٥۷	۲۳/۸٤	۲/٤٦	۲٤/۲
	ارزیابی	۷/۹	۱٦/۷۸	۱۸۱/۹٤	۲٤/۷٦	۲/۲٤	۱۹/٥
انحراف استاندارد	آموزشی	۱٤/۰٥	۱۳/۸۹	۱٥۰/٦۹	۱٤	۲/۱۱	۳۰/٤٥
	ارزیابی	۸/۷٤	۱۹/٥۸	۱۱٦/٤٦	۱۳/٦٥	۱/۸۷	۲٥/٥

برطبق شکل (۱) پراکندگی داده‌های پارامترها، متنوع و متفاوت است. داده‌های مسئله برای ساخت و بررسی مدل به دو مجموعه داده‌های آموزشی (۸۰٪) و ارزیابی (۲۰٪) تقسیم‌بندی شده‌اند. این داده‌ها بایستی از لحاظ شاخص‌های مقدار بیشینه، کمینه، میانگین و انحراف استاندارد نزدیک به هم باشند تا تطابق مناسبی با هم داشته‌باشند. مقادیر این شاخص‌ها برای مجموعه داده‌های آموزشی و ارزیابی به‌صورت جدول (۲) است. در جدول (۲) نشان داده‌شده‌است که مقادیر شاخص‌های آماری محاسبه‌شده برای دو مجموعه داده‌ی نزدیک به هم هستند.

طراحی مدل

مدل‌سازی بااستفاده از MEP

برای ساخت مدل پیش‌بینی نشست پی‌های سطحی، داده‌های آموزش به الگوریتم MEP معرفی شدند. داده‌ها شامل پارامترهای ورودی مستقل و پارامتر خروجی وابسته هستند. برای رسیدن به معادله‌ی پیش‌بینی منطقی و دقیق، الگوریتم MEP بارها با تنظیمات مختلف و لحاظ نمودن اشکال مختلف پارامترهای ورودی، اجرا گردید و مدل‌های متعددی ایجاد شد و از بین آنها مناسب‌ترین مدل انتخاب شد. جدول (۳) نحوه‌ی معرفی پارامترها و جدول (٤) تنظیمات پارامترهای الگوریتم MEP را برای دست‌یابی به مدل منتخب نهایی نشان می‌دهد.

جدول ۳ نحوه معرفی پارامترهای ورودی و خروجی به مدل MEP

پارامترهای ورودی	B, 1/L, LN(q), LN(N), Df
پارامتر خروجی	S

جدول ٤ تنظیمات پارامترهای الگوریتم MEP

تنظیمات پارامتر	پارامتر
٥	Num subpopulation
۲۰۰	Subpopulation size
٥۰	Code length
۰/۱	Crossover probability
۲۰۰	Num generations
۲	Num threads
۲۰	Num runs
$\times, \div, +, -$	Operator

معادله‌ی توسعه‌یافته با به‌کارگیری پارامترها و تنظیمات ارائه‌شده در جداول مذکور، بااستفاده از رویکرد MEP، به‌صورت زیر است:

$$S = \frac{1}{\mathrm{Ln(N)}} \times \frac{L \times D_f \times \mathrm{Ln(q)}}{(L \times \mathrm{Ln(N)}) + 1} +$$

$$(\mathrm{Ln}(q-N))\times\frac{2\times(\mathrm{Ln}(q)+B)}{\frac{2}{L}+\mathrm{Ln}(N)+D_f}$$

(۳)

که در این معادله B عرض پی (متر)، L طول پی (متر)، Df عمق مدفون پی (متر)، q ظرفیت باربری پی (کیلو پاسکال) و N عدد آزمایش SPT هستند. لازم به ذکر است که فرمول پیشنهادی، همانند دیگر روابط توسعه‌یافته با کمک روش‌های محاسبات نرم، فقط در محدوده‌ی داده‌های به‌کارگرفته‌شده (مطابق جدول ۲) معتبر است.

شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل

به‌منظور بررسی عملکرد مدل از داده‌های ارزیابی که نقشی در ساخت مدل نداشته‌اند استفاده شده‌است. این داده‌ها برای مقایسه بین نتایج روش این پژوهش با روش‌های محققان قبلی نیز استفاده شده‌اند. هم‌چنین عملکرد مدل برروی داده‌های آموزشی و کل نیز بررسی شده‌است. ارزیابی مدل‌ها در این پژوهش، براساس چهار شاخص آماری متداول، برروی نتایج پیش‌بینی نشست پی سطحی بااستفاده از مدل MEP توسعه‌یافته در این مطالعه و مدل‌های ارائه‌شده توسط محققان قبلی صورت گرفته‌است. معادلات ریاضی این شاخص‌های آماری برای ارزیابی مدل در ادامه ارائه شده‌اند.

۱. ضریب هم‌بستگی (CC: Correlation coefficient)

$$CC=\frac{\sum(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i-\bar{x})^2\sum(y_i-\bar{y})^2}} \quad (٤)$$

۲. ضریب تعیین (R^2: Coefficient of Determination)

$$R^2=1-\frac{\sum(x_i-y_i)^2}{\sum(x_i-\bar{x})^2} \quad (٥)$$

۳. خطای میانگین ریشه‌ی مربعات (RMSE: Root mean square error)

$$RMSE=\sqrt{\frac{1}{N}\sum(x_i-y_i)^2} \quad (٦)$$

٤. میانگین خطای مطلق (MAE: Mean absolute error)

$$MAE=\frac{\sum(x_i-y_i)}{N} \quad (٧)$$

که در این روابط x_i مقادیر اندازه‌گیری‌شده، y_i مقادیر پیش‌بینی‌شده، N تعداد مقادیر اندازه‌گیری‌شده و $\bar{x}$و $\bar{y}$ مقادیر متوسط اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شده هستند. نزدیک بودن مقدار عددی دو شاخص جذر میانگین مربعات خطا و میانگین انحراف مطلق خطا به عدد صفر نشان‌دهنده‌ی عملکرد بهتر مدل است. به‌علاوه، هرچه مقدار ضریب هم‌بستگی و ضریب تعیین به عدد یک نزدیک‌تر باشند مشخص می‌شود مدل عملکرد بهتری داشته‌است.

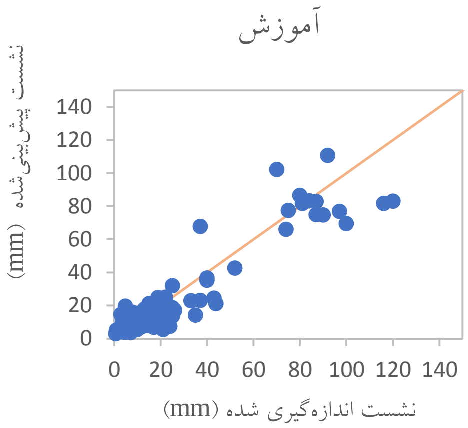
تحلیل نتایج مدل توسعه‌یافته

مدل جدید برای پیش‌بینی نشست پی سطحی برروی خاک دانه‌ای بااستفاده از ارزیابی شاخص‌های آماری مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۲) مقادیر نقاط داده برای مدل MEP را نشان می‌دهد. مطابق شکل (۲) نقاط داده به خط ایده‌آل (اندازه‌گیری شده= پیش‌بینی‌شده) نزدیک هستند و مدل جدید قادر است با دقت بالایی مقادیر پیش‌بینی را نزدیک به مقادیر هدف برآورد کند. این هم‌بستگی در مقادیر پایین‌تر نشست بسیار زیاد می‌باشد و با افزایش مقادیر فاصله‌ی نقاط از خط ایده‌آل بیشتر می‌شود. هم‌چنین مدل در هر سه گروه داده‌ی آموزش، ارزیابی و کل از توانایی خوبی در پیش‌بینی مقادیر نشست پی‌های سطحی برخوردار است که نشان‌دهنده‌ی عملکرد مناسب مدل پیشنهادی   است.

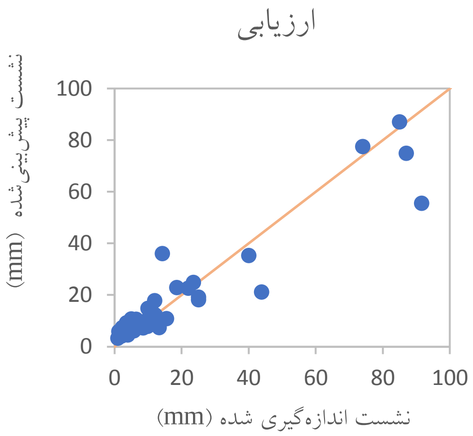
مطابق شکل (۳) مقایسه‌ای بین نتایج مدل‌های مختلف پیش‌بینی نشست پی سطحی انجام گرفته‌است. این نمودارها نشان می‌دهند مدل در MEP عملکرد بهتری در پیش‌بینی دقیق مقادیر نشست برای پی‌های سطحی دارد و همان‌طور که در شکل (۳) مشخص است مدل MEP درمقایسه با روش‌های قبلی که شامل مدل ANN شاهین و همکاران (۲۰۰۲) [3]، GP رضانیا و جوادی

(۲۰۰۷) [7] و GP، GEP و EPR شاه‌نظری و همکاران (۲۰۱٤) [8] با دقت بیشتری مقادیر را پیش‌بینی می‌کند.

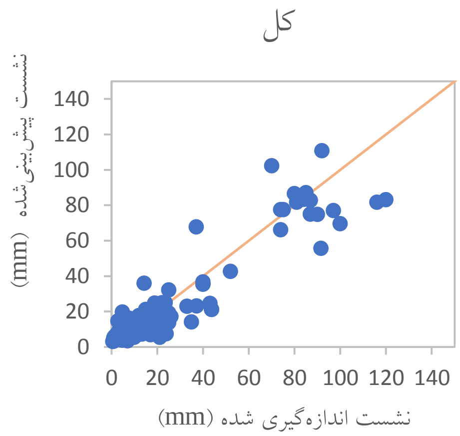
شاخص‌های آماری مدل توسعه‌یافته برای نشست پی سطحی برروی خاک‌های دانه‌ای در جدول (۵) با روش‌های قبلی مقایسه شد. در این جدول مقایسه‌ی مدل ارائه‌شده با مدل‌های گذشته برپایه‌ی ضریب همبستگی (CC)، ضریب تعیین (R^2)، خطای میانگین ریشه‌ی مربعات (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) انجام گرفته‌است وهمان‌طور که مشاهده می‌شود عموما برتری با مدل MEP است. از نقاط قوت مدل MEP می‌توان به‌سادگی ساختار آن، برتری ازنظر ضرایب (R^2) و (CC) در اکثر موارد و داشتن کمترین خطای میانگین ریشه‌ی مربعات (RMSE) و نیز میانگین خطای مطلق (MAE) در قیاس با تمام مدل‌های دیگر اشاره نمود.



(الف)

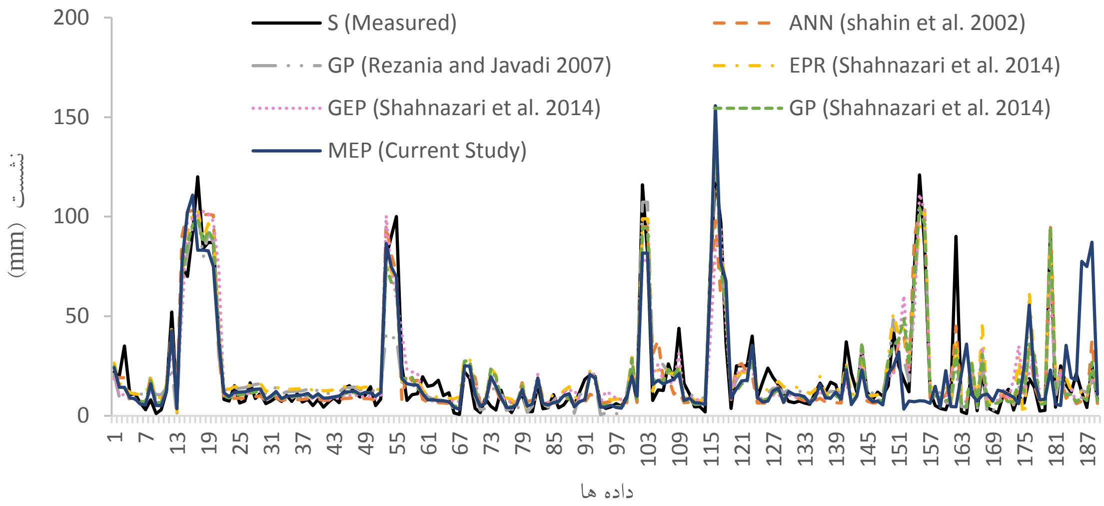


(ب)



(ج)

شکل ۲ مقادیر نقاط داده برای مدل MEP: (الف) داده‌های آموزشی (ب) داده‌های ارزیابی (ج)کل داده‌ها



شکل ۳ مقایسه نتایج مدل‌های مختلف پیش‌بینی نشست پی سطحی

جدول ۵ مقایسه بین شخص‌های آماری نتایج مدل MEP با دیگر روش‌ها

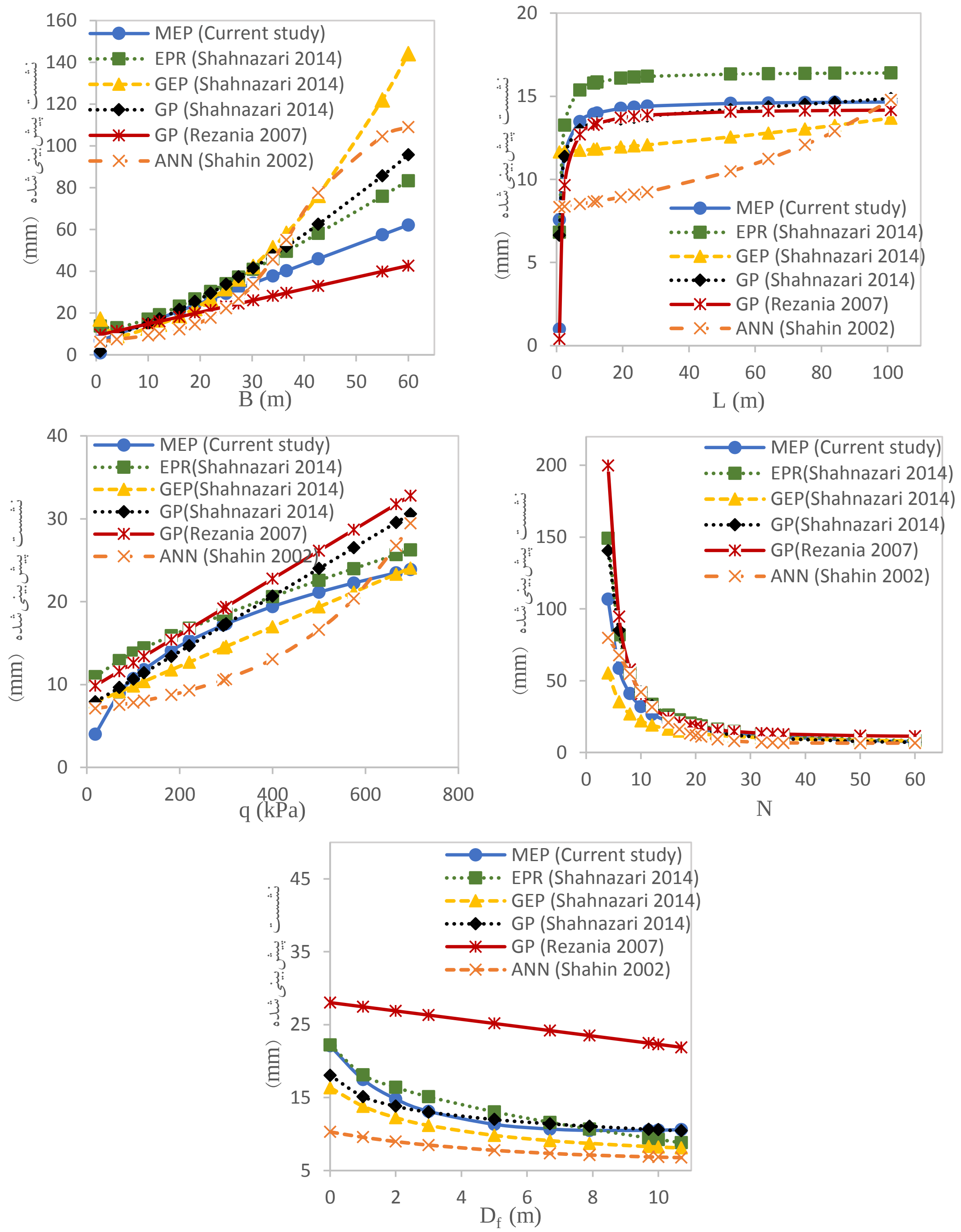
مراجع	روش	شاخص‌های آماری			
		CC (%)	R^2 (%)	RMSE	MAE
شاهین (۲۰۰۲)	ANN	۹۲/٦۲	۸۵/۸۲	۹/۸۹	۷/۱۲
رضانیا و جوادی (۲۰۰۷)	GP	٦۷/٦٦	۸۲/۵۹	۱۱/۰۷	٦/۷۷
شاه نظری (۲۰۱٤)	EPR	۹۳/۰٦	۸۷/۰۹	۹/۵۳	٦/۸۸
شاه نظری (۲۰۱٤)	GEP	۸۹/٤۱	۷۹/۹۳	۱۱/۸۹	۷/۷۳
شاه نظری (۲۰۱٤)	GP	۹۳/٦۹	۸۷/۷۸	۹/۲۷	٦/۰۳
مطالعه حاضر	MEP	۹۳/٤۵	۸۷/۲۵	۹/۱۳	۵/۷۷

مطالعه‌ی پارامتری

مطالعه‌ی پارامتری به بررسی رفتار مدل‌های پیش‌بینی‌شده مطابق با آنچه در تحقیقات تجربی دیده می‌شود، پرداخته و اثر تغییرات هر پارامتر ورودی، مورد مطالعه قرارگرفته‌است، درحالی‌که پارامترهای ورودی دیگر باتوجه به پایگاه داده‌ی موجود ثابت و برابر مقدار میانگین مقادیر آزمایشگاهی خود درنظر گرفته می‌شوند. برای بررسی بیشتر توانایی پیش‌بینی مدل‌های توسعه‌یافته در این مطالعه و برای مقایسه با مدل‌های قبلا توسعه‌یافته توسط شاهین و همکاران (۲۰۰۲) [3] و رضانیا و جوادی (۲۰۰۷) [7] و شاه‌نظری و همکاران (۲۰۱٤) [8] یک مطالعه‌ی پارامتری برای بررسی تأثیر ورودی‌های مدل در نشست‌های پیش‌بینی‌شده انجام شد. روند تغییرات نشست پی سطحی پیش‌بینی‌شده و آزمایشگاهی، برحسب افزایش پارامترهای ورودی برای تمام روش‌ها در شکل (٤) نشان داده شده‌است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود همه‌ی مدل‌ها قادر به تطابق رفتار فیزیکی مسئله‌ی نشست مطابق با تحقیقات تجربی هستند. برای مثال در تمام مدل‌ها می‌توان دریافت که نشست پی همان‌طور که انتظار می‌رفت با افزایش عرض پی، طول پی و ظرفیت باربری افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، نشست با افزایش عمق مدفون پی و متوسط تعداد ضربات آزمایش SPT، کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که باوجود این‌که تمامی مدل‌ها قادر به ارائه‌ی

روندهای متناسب با رفتار نشست هستند، مقدار نشست محاسبه‌شده توسط هر یک از مدل‌ها در شرایط مشابه دارای تفاوت می‌باشد. براساس مطالعات پارامتری، به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که تمامی پارامترهای ورودی بر نشست پی‌های سطحی روی خاک دانه‌ای مؤثر هستند اما وزن اثرات آنها متفاوت است.



شکل ٤ روند تغییرات نشست پیش‌بینی‌شده با افزایش مقدار پارامترهای ورودی و مقایسه آن با مدل‌های پیشین

تحلیل حساسیت

آنالیز حساسیت به‌منظور مشخص نمودن میزان تأثیر پارامترهای مختلف برروی مدل انجام می‌شود. برای برآورد کردن میزان تأثیر هر پارامتر مدنظر در معادله، داده‌های ورودی آن پارامتر از مسئله حذف می‌شود و مدل با داده‌های بقیه‌ی پارامترها ساخته می‌شود. این روند برای تک‌تک پارامترها انجام می‌شود تا با محاسبه‌ی خطاهای مدل‌های جدید و مقایسه‌ی آنها میزان تأثیر تمامی پارامترها مشخص شود. در جدول (٦) میزان تغییر بیشتر در دقت مدل با حذف یک پارامتر، نشان از تأثیرگذاری بیشتر آن پارامتر بر مدل پیش‌بینی دارد.

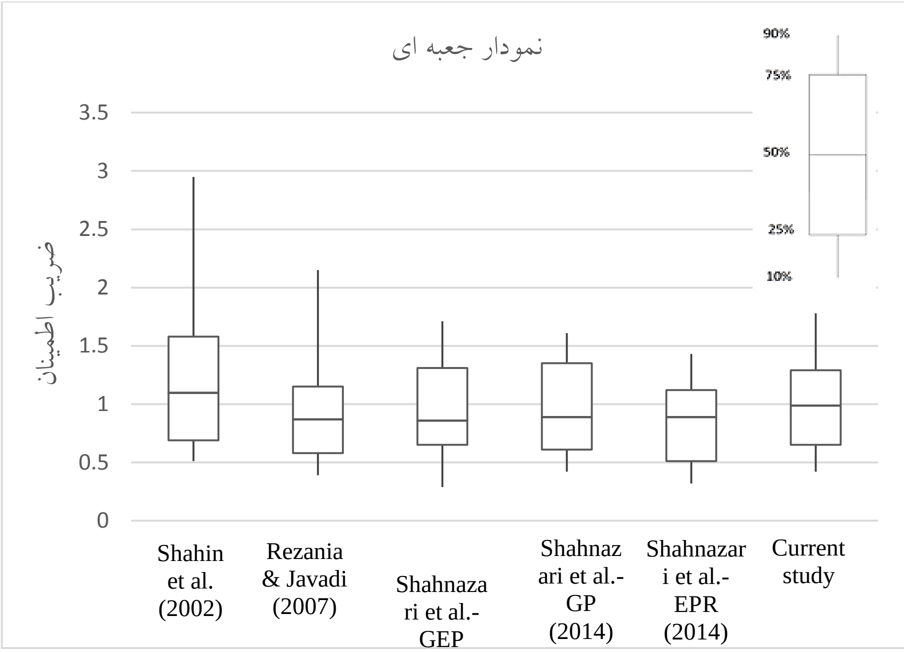
مقادیر چهار شاخص آماری CC، R^2، RMSE و MAE در جدول (٦) نشان می‌دهند که پارامتر N بیشترین اثر را برروی مدل MEP دارد زیرا با حذف آن شاخص‌های R2 و CC به‌شدت کاهش یافته و شاخص‌های RMSE و MAE به میزان قابل‌توجهی افزایش داشته‌اند و بعد از آن پارامتر عرض پی (B)، پارامتر ظرفیت باربری (q) و عمق مدفون پی (Df) به‌ترتیب برروی مدل تأثیرگذار می‌باشند؛ اما حذف پارامتر طول پی (L) چندان مؤثر به‌نظر نمی‌رسد.

ضریب اطمینان

به‌منظور ارائه‌ی ضرایب اطمینان مدل در این پژوهش از نمودارهای جعبه‌ای استفاده شده‌است. برای تهیه‌ی نمودارهای جعبه‌ای ابتدا نسبت مقادیر نشست پی سطحی اندازه‌گیری‌شده به پیش‌بینی‌شده محاسبه می‌گردد و توزیع احتمالاتی آنها به‌دست می‌آید. سپس مقادیر چارک اول، میانه، چارک سوم، مقداری که ۱۰٪ داده‌ها از آن کوچک‌تر هستند و مقداری که ۹۰٪ داده‌ها از آن کوچک‌تر هستند، به‌دست می‌آید و نمودار جعبه‌ای براساس آنها رسم می‌شود. بر این اساس، هر چه نمودار جعبه‌ای جمع‌تر و مقدار میانه به عدد یک نزدیک‌تر باشد عملکرد مدل از لحاظ قابلیت اطمینان پیش‌بینی بهتر است. شکل (۵) نمودار جعبه‌ای مدل MEP را در کنار نمودارهای جعبه‌ای سایر روش‌ها نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود باتوجه به طول نمودارهای جعبه‌ای، مدل MEP کمترین پراکندگی را نشان می‌دهد و نیز مقدار متناظر با ۵۰٪ (میانه) آن درمقایسه با روش‌های دیگر به عدد یک نزدیک‌تر می‌باشد؛ بنابراین می‌توان گفت عدم قطعیت در پیش‌بینی نشست با مدل MEP درمقایسه با مدل‌های دیگر محققان کمتر است.

جدول ٦ آنالیز حساسیت مدل MEP

مدل	شاخص‌های آماری			
	CC (%)	R^2 (%)	RMSE	MAE
MEP	۹۳/٤٥	۸۷/۲٥	۹/۱۳	٥/۷۷
MEP در غیاب 1/L	۹۳/٦۳	۸۷/۲۳	۹/۱٤	٥/٦٦
MEP در غیاب B	۸۷/۷۸	۷٦/۹۳	۱۲/۲۹	۷/۲۹
MEP در غیاب Ln(q)	۹۱	۸۲/٥٦	۱۰/٦۸	٦/٤۱
MEP در غیاب Ln(N)	٦۹/۲۷	٤٤/۳۲	۱۹/۰۹	۱۰/۳۱
MEP در غیاب Df	۹۱/۹۹	۸۳/۷۳	۱۰/۳۲	٦



شکل ۵ نمودار ضرایب اطمینان مدل‌های مختلف پیش‌بینی نشست پی سطحی

نتیجه‌گیری

باتوجه به اهمیت پیش‌بینی نشست پی سطحی برروی خاک دانه‌ای در این مقاله یک مدل جدید برای پیش‌بینی نشست تهیه شده‌است. این مدل براساس الگوریتم برنامه‌نویسی چندعبارتی (MEP) برطبق روش‌های برنامه‌نویسی ژنتیک ساخته شده‌است. برای ایجاد این مدل ۱۸۹ داده‌ی آزمایشگاهی از مطالعات پیشین جمع‌آوری شده‌است. داده‌ها ابتدا به‌صورت آموزشی و ارزیابی تقسیم‌بندی شده و سپس داده‌ها به الگوریتم MEP ارائه شده‌است. مدل جدید تولیدشده با دقیق‌ترین روبط در ادبیات فنی موجود مقایسه شده‌اند. به‌علاوه مطالعه‌ی پارامتری، تحلیل حساسیت و هم‌چنین بررسی ضرایب اطمینان برروی مدل انجام شده‌است. برپایه‌ی نتایج حاصل از این مطالعه می‌توان موارد زیر را بیان نمود:

۱. مدل MEP پیشنهادشده قادر است به‌درستی نشست پی سطحی برروی خاک‌های غیرچسبنده را پیش‌بینی کند. باتوجه به‌دقت و سادگی آن، این مدل می‌تواند با موفقیت در پروژه‌های عملی مورداستفاده قرار گیرد.

۲. مقایسه بین مدل MEP و دقیق‌ترین مدل‌ها شامل ANN، GP، GEP و EPR در ادبیات فنی نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی در این مطالعه، عملکرد بهتری نسبت‌به اکثر مدل‌های توسعه‌یافته‌ی قبلی دارد.

۳. در مطالعه‌ی حاضر شاخص‌های آماری CC و R^2 به‌ترتیب برابر ۹۳/۴۵ درصد و ۸۷/۲۵ درصد و شاخص‌های آماری RMSE و MAE به‌ترتیب برابر ۹/۱۳ و ۵/۷۷ به‌دست آمد که نشان‌دهنده‌ی برتری این مدل جدید نسبت‌به مدل‌های پیشین است.

۴. نتایج مطالعه‌ی پارامتری انجام‌شده برروی داده‌ها نشان می‌دهد که رفتار مدل MEP ارائه‌شده با رفتارهای مورد انتظار از دید ژئوتکنیکی هم‌خوانی دارند.

۵. براساس تحلیل حساسیت انجام‌شده در این پژوهش می‌توان دریافت عدد SPT لایه‌ی زیرین، عرض پی، ظرفیت باربری پی، عمق مدفون پی و طول پی به‌ترتیب مهم‌ترین پارامترهای ورودی هستند که بر

تخمین نشست پی سطحی واقع بر خاک دانه‌ای تأثیر می‌گذارند.

٦. باتوجه به بررسی ضریب اطمینان و نمودار ارائه‌شده می‌توان گفت عدم قطعیت در پیش‌بینی نشست با مدل MEP در مقایسه با مدل‌های دیگر محققان کمتر است.

٧. در تحقیق حاضر قابلیت رویکرد MEP در یافتن راه‌حل برای مسئله‌ی غیرخطی نشست شالوده‌های سطحی روی خاک‌های دانه‌ای به‌وضوح نشان داده شده‌است. علاوه بر این، امکان پیشرفت بیشتر قابلیت پیش‌بینی توسط تکنیک پیشنهادی با آموزش مجدد مدل با داده‌های جدید فراهم است. اطلاعات بیشتر در مورد پارامترهای منعکس‌کننده‌ی شرایط میدانی زمین و بار می‌تواند به‌طور محسوسی به محققان کمک کند تا مدل‌های قابل‌اطمینان‌تری را برای پیش‌بینی دقیق نشست پی‌های سطحی برروی خاک‌های دانه‌ای ارائه دهند.

فهرست علائم

برنامه‌نویسی ژنتیک	GP
برنامه‌نویسی چندعبارتی	MEP
شبکه‌ی عصبی مصنوعی	ANN
برنامه‌نویسی بیان ژن	GEP
رگرسیون چندمتغیره‌ی تکاملی	EPR
عرض پی، m	B
طول پی، m	L
ظرفیت باربری پی، kPa	q
عدد آزمایش SPT	N
عمق مدفون پی، m	Df
نشست، mm	S
ضریب هم‌بستگی	CC
ضریب تعیین	R^2
خطای میانگین ریشه‌ی مربعات	RMSE
میانگین خطای مطلق	MAE

مراجع

1. Schmertmann, J. H., "Static Cone to Compute Static Settlement over Sand", *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, Vol. 96, No. 3, pp. 1011-1043, (1970).
2. Poulos, Harry George, "Settlement of Isolated Foundations", University of Sydney, School of Civil Engineering, (1975).
3. Shahin, M. A., Maier, H. R., and Jaksa, M. B., "Predicting Settlement of Shallow Foundations Using Neural Networks", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 128.9, pp. 785-793, (2002).
4. Maugeri, M., et al., "Observed and Computed Settlements of two Shallow Foundations on Sand", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering*, Vol. 124.7, pp. 595-605, (1998).
5. Coduto, D. P., "Foundation Design; Priciples and Practis", Practice Hall International, New Jersey, (1994).
6. Sower, G. B., and G. F. Sower, "Introductory Soil Mechanics and Foundation", pp. 102, (1970).
7. Rezania, M., and Javadi, A. A., "A New Genetic Programming Model for Predicting Settlement of Shallow Foundations", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 44.12, pp. 1462-1473, (2007).
8. Shahnazari, H., Shahin, M. A., and Tutunchian, M. A., "Evolutionary-based Approaches for Settlement Prediction of Shallow Foundations on Cohesionless Soils", *International Journal of Civil*

Engineering, Vol. 12.1, pp. 55-64, (2014).

9. Derakhshani, A., "Estimating Uplift Capacity of Suction Caissons in Soft Clay: A Hybrid Computational Approach Based on Model Tree and GP", *Ocean Engineering*, Vo. 146, pp. 1-8, (2017).
10. Talebi, A., and Derakhshani, A., "Estimation of P-multipliers for Laterally Loaded Pile Groups in Clay and Sand", *Ships and Offshore Structures*, Vol. 14.3, pp. 229-237, (2019).
11. Khorrami, R., and Derakhshani, A., "Estimation of Ultimate Bearing Capacity of Shallow Foundations Resting on Cohesionless Soils Using a New Hybrid M5'-GP Model", *Geomechanics and Engineering*, Vol. 19.2, pp. 127-139, (2019).
12. Oltean, M., and Dumitrescu, D., "Multi Expression Programming", *Journal of Genetic Programming and Evolvable Machines*, Kluwer, second tour of review, (2002).
13. Banzhaf, W., et al., Genetic Programming: An Introduction. Vol. 1. San Francisco: Morgan Kaufmann, (1998).
14. Alavi, A. H., et al., "Utilisation of Computational Intelligence Techniques for Stabilised Soil", *6th International Conference on Engineering Computational Technology*, ECT 2008, (2008).
15. Alavi, A. H., et al., "Soft Computing Based Approaches for High Performance Concrete", *6th International Conference on Engineering Computational Technology*, ECT 2008, (2008).
16. Gandomi, A. H., et al., "Application of a Coupled Simulated Annealing-genetic Programming Algorithm to the Prediction of Bolted Joints Behavior", *American-Eurasian Journal of Scientific Research*, Vol. 3.2, pp. 153-162, (2008).
17. Gandomi, A. H., et al., "Behavior Appraisal of Steel Semi-rigid Joints Using Linear Genetic Programming", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 65.8-9, pp. 1738-1750, (2009).
18. Cevik, A., and Firat Cabalar, A., "Modelling Damping Ratio and Shear Modulus of Sand–mica Mixtures Using Genetic Programming", *Expert Systems with Applications*, Vol. 36.4, pp. 7749-7757, (2009).
19. Oltean, M., and Groşan, C., "Evolving Evolutionary Algorithms Using Multi Expression Programming", *European Conference on Artificial Life*, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 651-658, (2003).
20. Oltean, M., and Groşan, C., "A Comparison of Several Linear Genetic Programming Techniques", *Complex Systems*, Vol. 14.4, pp. 285-314, (2003).
21. Burland, J. B., et al., "Settlement of Foundations on Sand and Gravel", *Proceedings of the institution of Civil Engineers*, Vol. 78.6, pp. 1325-1381, (1985).
22. Meyerhof, G. G., "Shallow Foundations", *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, 91, Proc. pp. 4275, (1965).
23. Bazaraa, A., Sadik, S., "Use of the Standard Penetration Test for Estimating Settlements of Shallow

Foundations on Sand", University of Illinois at Urbana-Champaign, (1968).

24. Briaud, J. L., and Gibbens, R., "Behavior of five large spread footings in sand", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,* Vol. 125.9, pp. 787-796, (1999).
25. Burbidge, M. C., "A Case Study Review of Settlements on Granular Soil", Diss. Imperial College, University of London, (1982).
26. Picornell, M., and Del Monte, E., "Prediction of Settlements of Cohesive Granular soils", Measured Performance of Shallow Foundations, ASCE, (1988).
27. Wahls, H. E., "Settlement Analysis for Shallow Foundations on Sand", *Proceedings of the 3rd International Geotechnical Engineering Conference,* Cairo, Egypt, pp. 7-28 **,** (1997).